第40卷 第4期
2023年4月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

基于地理探测器的河套灌区林草植被覆盖度时空变化与驱动力分析

李鑫磊[1]， 李瑞平[1,2]， 王秀青[3]， 王思楠[1]， 王成坤[1]

（1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古自治区农牧业大数据研究与应用重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；3. 内蒙古自治区测绘地理信息中心，内蒙古 呼和浩特 010050）

摘 要：基于2000—2019年的林草植被覆盖度数据分析了河套灌区近20 a的林草植被时空变化特征，并利用地理探测器定量分析了各驱动因子对林草植被覆盖的影响。结果表明：(1) 近20 a河套灌区林草地面积总体呈减少态势，减少量为966.15 km^2，林草植被覆盖度等级整体呈上升趋势，多年平均林草植被覆盖度为28.3%，空间尺度上，河套灌区林草植被覆盖度呈现出东北向西南递减的空间变化特征；(2) 近20 a低林草植被覆盖度、中林草植被覆盖度等重心主要位于永济灌域东北侧和义长灌域西南侧，各级林草植被覆盖重心表现为从东北向西南方向递减，并均呈现出向西南方向迁移的态势，各时段迁移距离介于0.71~15.46 km；(3) 距水域距离、地下水埋深、气温、降水是影响区域内林草植被覆盖度的主导环境因子，且解释力分别为0.427、0.439、0.318、0.368；距水域距离、地下水埋深、年平均降水与其他因子的交互作用普遍较高，区域含水量的大小是影响河套灌区林草地生长状况的主要驱动力，研究结果可为灌区自然植被的保护与恢复提供相应的科学依据。

关键词：河套灌区；林草植被覆盖度；时空变化；驱动因子；地理探测器

林草作为陆地生态系统的重要组成部分之一，在全球物质循环及能量流动中发挥着重要的作用，对缓解地区水土流失具有明显的生态效益[1-3]。植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)可以作为衡量植被生长状况的一个重要的指标，能够反映出区域自然生态系统中存在的植被退化等各种环境问题，是估算和监测区域生态系统稳定性和功能的重要参数[4-6]，很多学者基于植被覆盖度数据应用不同方法分析了区域植被的生长变化情况及驱动力分析，大量研究发现气象因素(气温、降水)对植被生长变化的解释力较强[7-13]。如马晓妮等[14]通过对黄土高原的砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子的量化分析表明，降水、气温、土壤水分是影响砒砂岩区植被覆盖空间分布的主导环境因子。近年来，更多的学者定量分析和评价了自然环境因子对植被生长的影响，而对植被生长与人类活动的响应关系探究较少，实际上，人类活动对植被生长与变化的影响也不容忽视[15]。

地理探测器是基于一组统计学方法来探测空间分异性，揭示其背后驱动力的空间统计方法[16-18]。祝聪等[19]通过地理探测器对2006—2016年岷江上游植被覆盖度的时空变化进行了驱动力分析，发现岷江上游植被覆盖度主要受海拔、气温、土壤类型、降水4个因子的影响。许多研究对区域植被覆盖度时空变化的驱动力分析有着重要的意义，但大多只是对驱动因子对植被覆盖度的解释力进行了定量分析，缺乏对影响植被生长的驱动因子适宜条件的探究。

河套灌区大部分区域处于荒漠化边缘地带，导致该地区的草地、林地等自然植被处于退化的边缘[20]，并且作为我国较大的农牧交错带，常年的耕作和灌溉，导致其地下水位下降和土壤盐碱化加剧，从而加重了生态系统的复杂性和脆弱性，若不予以有效保护，极易向荒漠化演变[21-22]。近年来，不少学者对

收稿日期：2022-05-24； **修订日期：**2022-11-25
基金项目：国家自然科学基金项目(51839006，52069021)
作者简介：李鑫磊(1998-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区自然植被研究. E-mail: 1947977377@qq.com
通讯作者：李瑞平. E-mail: nmglrp@163.com

包含河套灌区在内的黄河流域和蒙陕甘地区的植被覆盖进行了研究，其中，张志强等[23]分析了2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空分布格局，对制定黄河流域生态保护方案提供了数据支撑；苏丽德等[24]对1986—2019年乌拉特后旗荒漠化动态变化进行了分析，发现了乌拉特后旗90%的区域都处于荒漠化状态。然而，以往的植被覆盖度的研究一般都是对区域总体植被进行了分析，而对于以农业为主的河套灌区，区域总体植被覆盖度的结论很难反映出自然植被的生长情况。因此本文以此为切入点，开展河套灌区林草植被年际动态变化的研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区位于我国内蒙古自治区巴彦淖尔市，是我国三大灌区之一，也是亚洲最大的灌区（图1）。灌区属温带大陆性季风气候，年降水量较少，年平均降水量约为135~225 mm，主要集中于7—9月。蒸发量比较大，年平均蒸发量约为1750 mm。多年平均气温约为5.6 ℃，灌区北依阴山山脉，南临黄河，东接内蒙古包头市郊，西靠乌兰布和沙漠。东西跨度约为250~260 km，南北跨度约为45~60 km。灌区地形平坦，整体海拔介于911~1167 m之间。灌区年引黄水量约$50\times10^9\ m^3$，占黄河过境水量的六分之一，是灌区重要的水资源来源。

1.2 数据来源及预处理

本文共使用与研究相关的12种基础数据。包括用于提取植被覆盖度的遥感数据，提取林草植被的土地利用矢量数据以及用于分析的地形数据、气象数据、地下水数据、GDP和人口数据、距水域、公路、居民点、耕地距离数据（表1）。

1.3 研究方法

1.3.1 林草植被覆盖度 利用像元二分模型估算植被覆盖度[25]，计算公式如下：

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{soil}}{NDVI_{veg}-NDVI_{soil}} \tag{1}$$

式中：FVC表示植被覆盖度，本文参考李苗苗等[26]提出的$NDVI_{veg}$和$NDVI_{soil}$的取值方法，在NDVI的频率累计表上取给定置信区间内的最大值和最小值，分别作为$NDVI_{veg}$和$NDVI_{soil}$，因此本文结合河套灌区的实际情况与前人研究采用5%~95%的置信区间估算植被覆盖度，通过林草地矢量数据提取河套灌区林草地植被覆盖度。

参考中华人民共和国水利部2008年颁发的《土

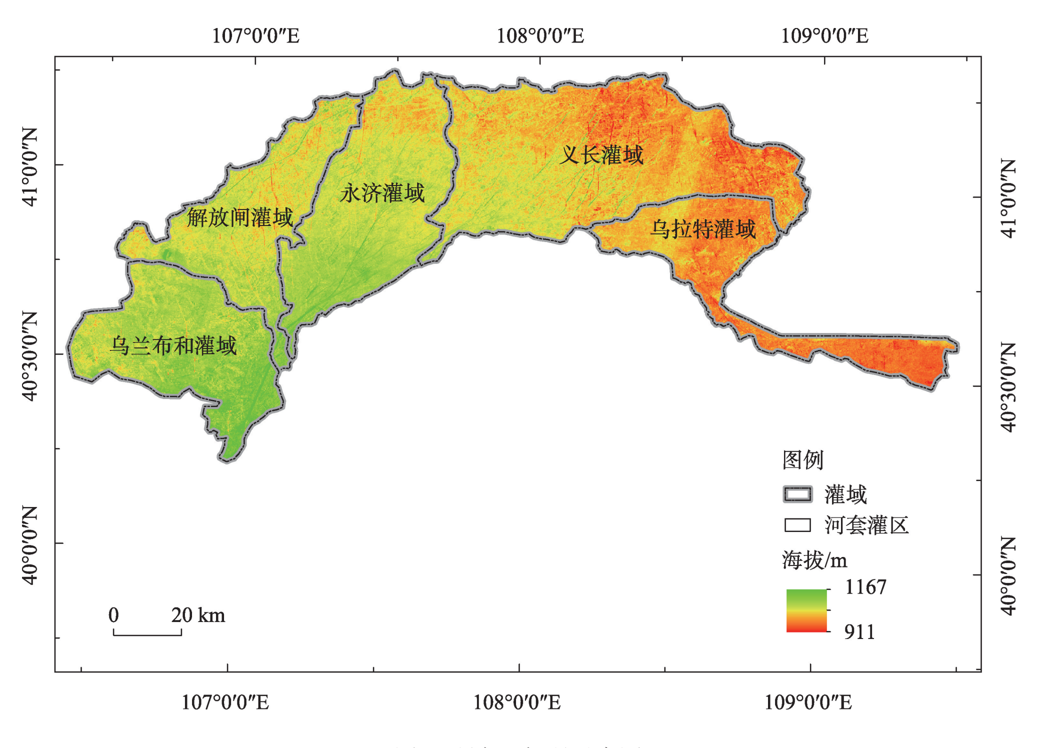


图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Survey map of the study area

表1　双因子交互作用结果分类

Tab. 1　Two-factor interaction results classification table

数据类型	数据来源	产品	分辨率(时间范围)	预处理
遥感数据	Google Earth Engine 遥感云平台(https://earthengine.google.com)	Landsat Surface Reflectance Tier 1 系列数据	30 m(2000—2019年)	数据集都经过几何校正、大气校正等预处理，同时结合区域的物候规律，选取每年7—10月植被生长旺盛季作为数据源
土地利用类型矢量数据	内蒙古土地调查规划院	巴彦淖尔市各个旗县的土地利用类型矢量数据	2000年、2009年、2019年	利用ArcGIS软件进行拼接、裁剪等处理得到河套灌区土地利用矢量数据
地形数据	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)	ASTER GDEM 数字高程产品	30 m (2009年、2019年)	通过ENVI软件进行无缝镶嵌、投影、裁剪等处理得到河套灌区高程数据
气象数据	中国气象科学数据共享网站(http://data.cma.gov.cn/)	降水量、气温	2009年、2019年	基于反距离权重内插法生成150 m分辨率的栅格数据
地下水数据	通过自动水位监测系统采集，地下水位观测井共176眼	–	2009年、2019年	通过数据整理与插值计算得到河套灌区150 m分辨率的地下水位栅格图
GDP和人口数据	巴彦淖尔市统计局	巴彦淖尔市社会统计年鉴	2009年、2019年	基于反距离权重内插法生成150 m分辨率的栅格数据
距水域、公路、居民点、耕地距离	–	–	2009年、2019年	提取土地利用矢量数据中各要素，基于欧氏距离计算每个像元到各要素之间的距离，通过重采样生成150 m分辨率的栅格数据

壤侵蚀分类分级标准》[27]与植被覆盖度分级要求的相关文献结合野外实际调查情况，将植被覆盖度通过密度分割划分成5个等级(表2)。

表2　植被覆盖度分级

Tab. 2　Vegetation coverage classification

植被覆盖度等级	FVC
低植被覆盖度	<15%
较低植被覆盖度	15%~30%
中植被覆盖度	30%~45%
较高植被覆盖度	45%~60%
高植被覆盖度	>60%

1.3.2　FVC变化趋势分析法　年均FVC变化趋势表达式如下：

$$slope = \frac{n\sum_{i=1}^{n} ix_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} x_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{2}$$

式中：*slope*表示林草植被覆盖度变化趋势斜率；n表示研究时间序列的长度；变量i表示年份序号；x_i表示第i年的植被覆盖度。其中，当*slope*值为正时，表明在研究时段内的植被覆盖度呈增加趋势；若*slope*值为负值，则表明植被覆盖度在研究时段内呈减少趋势。

1.3.3　重心迁移模型　重心迁移模型是较为常见的分析模型之一，它能够直观地表现出某个要素在空间上迁移的规律以及集聚的情况[28]。重心迁移模型计算公式如下：

$$X_r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(F_{is} \times x_i)}{\sum_{i=1}^{n} F_{is}} \tag{3}$$

$$Y_r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(F_{is} \times y_i)}{\sum_{i=1}^{n} F_{is}} \tag{4}$$

式中：X_r、Y_r表示各等级植被覆盖度重心的经纬度坐标；F_{is}表示第i个植被覆盖度像元在第s年的值；x_i、y_i为第s年在第i个格网上植被覆盖度的重心坐标。

1.3.4　FVC驱动因子定量分析

(1) 因子探测

探测植被覆盖度的空间分异性和各个驱动因子对林草植被覆盖度空间分异性的解释程度，用q值度量，计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{5}$$

$$SSW = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2,\quad SST = N\sigma^2 \tag{6}$$

式中：h为林草植被覆盖度或驱动因子的分类或分区；N_h和N分别为第h分区与全区的单元数；σ_h^2和σ^2分别为第h分区与全区y值的方差。SSW和SST分别为层内方差之和与全区总方差。q的值域为[0,1]，q值越大则表示驱动因子x对植被覆盖度y

的解释力就越强，反之则越弱。

（2）交互探测器

交互探测器用于识别不同驱动因子之间的交互作用，即探测驱动因子X_1和驱动因子X_2共同作用时对植被覆盖度的解释力是增强还是减弱。不同因子交互作用的差异主要体现出5种结果，$q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Min}[q(X_1), q(X_2)]$交互作用非线性增强，$\mathrm{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Max}[q(X_1), q(X_2)]$交互作用为单因子非线性增强，$q(X_1 \cap X_2) > \mathrm{Max}[q(X_1), q(X_2)]$交互作用为双因子增强，$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$交互作用为独立交互作用，$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$交互作用为非线性增强。

（3）风险区探测

风险区探测用于判断各驱动因子的子区域间的属性均值是否有显著的差别，并且可以找出林草植被适宜生长的范围。风险探测用t统计量来检验，表达公式如下：

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\mathrm{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\mathrm{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}}\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{7}$$

式中：$\bar{Y}$为子区域h内林草植被覆盖度的线性回归系数；n_h为子区域h内样本的数量。

2 结果与分析

2.1 河套灌区林草FVC空间分布特征

图2为2000—2019年5个时期的植被覆盖度等级空间分布图。河套灌区在每年林草长势最旺盛的7—9月林草植被覆盖度总体呈东高西低的态势分布，多年来43.2%~51.6%的低植被覆盖度林草主要分布于西部的乌兰布和灌域，53.1%~57.4%的较高和高植被覆盖度林草主要分布于东部的乌梁素海的周边地区。这是由于西部林草多以沙漠—草甸的形式存在，地下水位较低、稳定性较弱，导致林草的长势较差，而东部由于存在着乌梁素海等较为丰富的水源，并且近年来受“一湖两海”政策的影响，生态保护力度加强。但20 a来西南地区的较高植被覆盖度和高植被覆盖度的数量增加，而东北地区却有所减少。

为了进一步探究和分析河套灌区林草覆被变化的情况，对2000—2019年不同等级的林草植被覆盖度进行等级转移矩阵运算。表3为2000—2019年河套灌区林草植被覆盖度等级转移矩阵。可以看出，研究时段内共有1647.79 km²的其他土地利用类型转变为林草，其中转入较低植被覆盖度和中植被覆盖度的较多，分别为652.75 km²、413 km²。共有2613.94 km²的林草地转变其他土地利用类型，其中低植被覆盖度和较低植被覆盖度转出的较多，分别为984.38 km²、1078.26 km²，并且转出部分主要分布于乌兰布和灌域的荒漠地带。20 a间，林草地数量整体呈减少的态势，但从植被覆盖度等级转化来看，低等级植被覆盖度转为高等级植被覆盖度的数量为520.62 km²，高等级植被覆盖度转为低等级植被覆盖度的数量为151.51 km²，由此看出，河套灌区林草地生长状况整体上得到改善。

2.2 河套灌区FVC时序变化特征

如图3所示，河套灌区林草植被覆盖以较低植被覆盖为主，占林草植被总面积的37.01%~43.53%；其次是低植被覆盖度、中植被覆盖和较高植被覆盖，而高植被覆盖的林草地则分布最少，占林草植被总面积的3.8%~6.24%。其中在2000—2009年低植被覆盖和较低植被覆盖占比总体呈下降态势，而中植被覆盖、较高植被覆盖和高植被覆盖呈上升态势，这说明该时期河套灌区林草地的生长状况得到了改善。在2009—2014年低植被覆盖和较低植被覆盖占比总体呈上升态势，而中植被覆盖、较高植被覆盖和高植被覆盖呈下降的态势，说明这时期林草生长状况有所恶化。在2014—2019年低植被覆盖和较低植被覆盖占比总体又呈下降态势，而中植被覆盖、较高植被覆盖和高植被覆盖呈上升的态势，说明此时段河套灌区林草生长状况得到改善。

由图4可以看出，河套灌区多年平均FVC为0.283，平均FVC在2002年、2007年、2009年、2019年出现峰值，分别为0.337、0.323、0.353、0.304，谷值出现在2001年、2006年、2008年、2016年，分别为0.234年、0.278年、0.250年、0.265年。在整个研究时段内河套灌区平均FVC呈现出较为明显的波动震荡，平均FVC的高低交替比较频繁，多年平均FVC呈现为较低植被覆盖度，FVC的线性趋势不显著，整体上变化不明显。相对变化率在2001—2002年、2005—2006年、2008—2009年、2016—2017年增长的速率较快，说明这4个时期林草覆盖增多，得到了较好的改善。而在2002—2003年、2004—2005年、2009—2010年、2014—2015年减少的速率较快，说明这4个时期林草植被覆盖度相对上一年有所

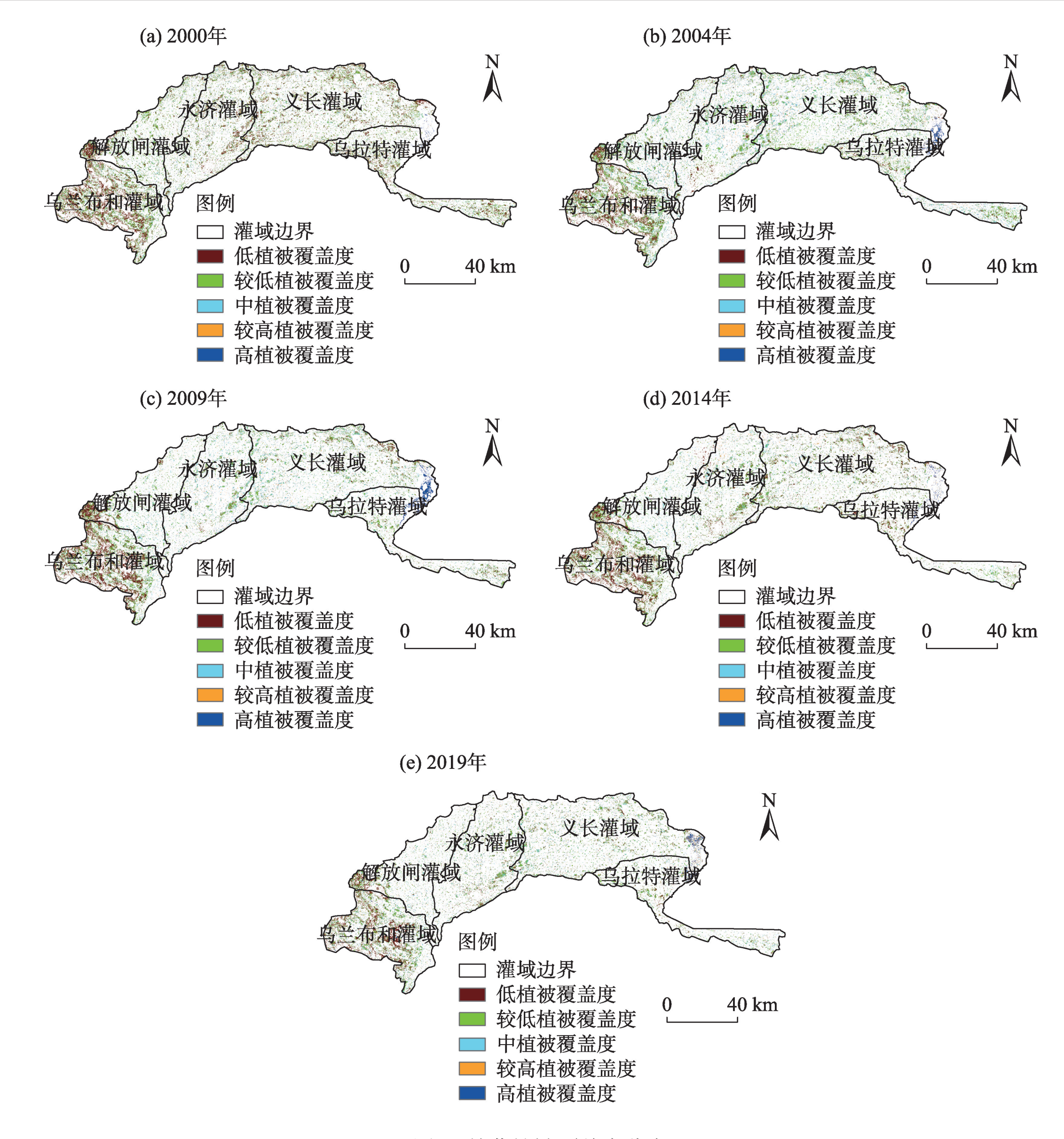


图2　林草植被覆盖度分布

Fig. 2　Vegetation coverage distribution of forest and grass

表3　2000—2019年河套灌区林草植被覆盖度等级转移矩阵

Tab. 3　Grade transfer matrix of forest-grass vegetation coverage in Hetao Irrigation District from 2000 to 2019　/km²

FVC等级	低	较低	中	较高	高	转入
低	111.91	58.24	7.06	1.5	0.66	342.49
较低	182.67	237.46	44.39	8.25	3.05	652.75
中	71.14	153.32	55.92	14.68	6.42	413
较高	15.77	37.2	23.01	10.54	7.26	143.93
高	6.6	12.7	10.28	7.93	11.44	95.62
转出	984.38	1007.26	401.12	133.27	87.91	

减少。

2.3　各级林草FVC重心迁移

重心迁移模型主要体现在方向和距离特征上的变化规律,可以反映出景观时空变化情况。由图5可以看出,低覆盖类林草重心在整个研究时段均位于永济灌域内,在2000—2003年,低植被覆盖类林草的重心迁移的距离最大,为12.154 km;较低覆盖类林草重心在整个研究时段均位于永济灌域西

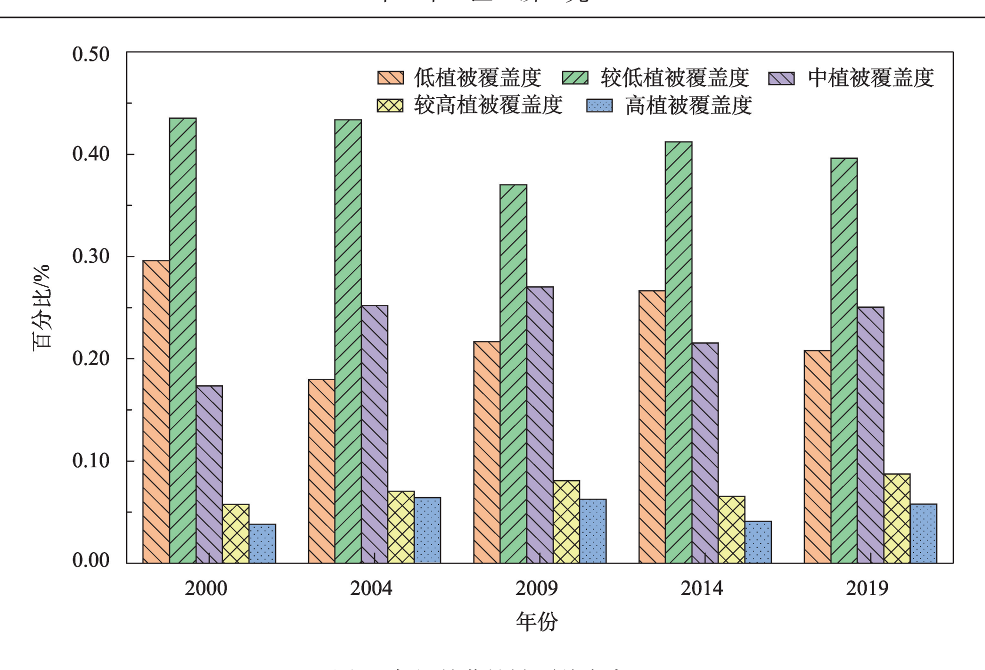


图3 各级林草植被覆盖度占比

Fig. 3 Trend map of coverage ratio of forest and grass vegetation at all levels

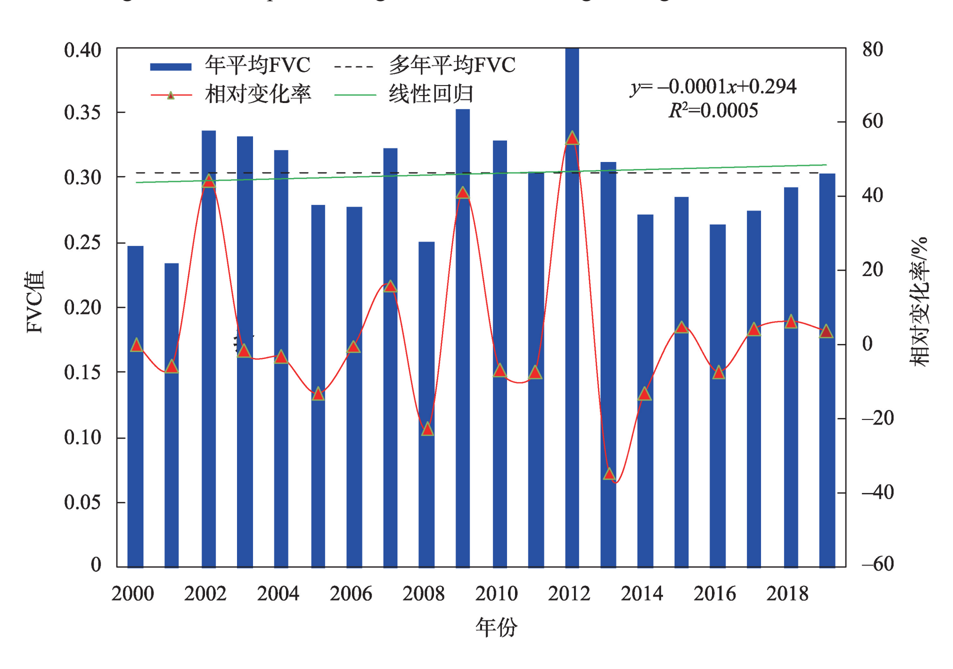


图4 河套灌区林草植被平均FVC变化特征

Fig. 4 Average FVC variation characteristics of forest and grass vegetation in Hetao Irrigation District

南侧，总体位于低覆盖类的东北侧，在2013—2016年，较低植被覆盖类林草的重心迁移的距离最大，为11.857 km；中覆盖类林草重心分布于永济灌域和义长灌域的交界地带，总体位于低覆盖类和较低覆盖类的东北侧，在2003—2006年，中植被覆盖类林草的重心迁移的距离最大，为8.137 km；较高覆盖类林草重心分布于永济灌域和义长灌域的交界地带，在2003—2006年，较高植被覆盖类林草的重心迁移的距离最大，为15.455 km；高覆盖类林草重心分布于义长灌域的西南侧，在2003—2006年，高植被覆盖类林草的重心迁移的距离最大，为9.707 km。各级林草植被覆盖重心总体呈向西南迁移的态势，并各级林草植被覆盖重心表现为从东北向西南方向递减。

2.4 林草植被覆盖度变化驱动力量化

2.4.1 探测因子单因素分析 为探究不同环境因子与人类活动对河套灌区林草植被覆盖度空间分异的影响，选取了9种探测因子进行分析，得到单因子影响的解释力 q 值(图6)，林草植被覆盖度空间分异

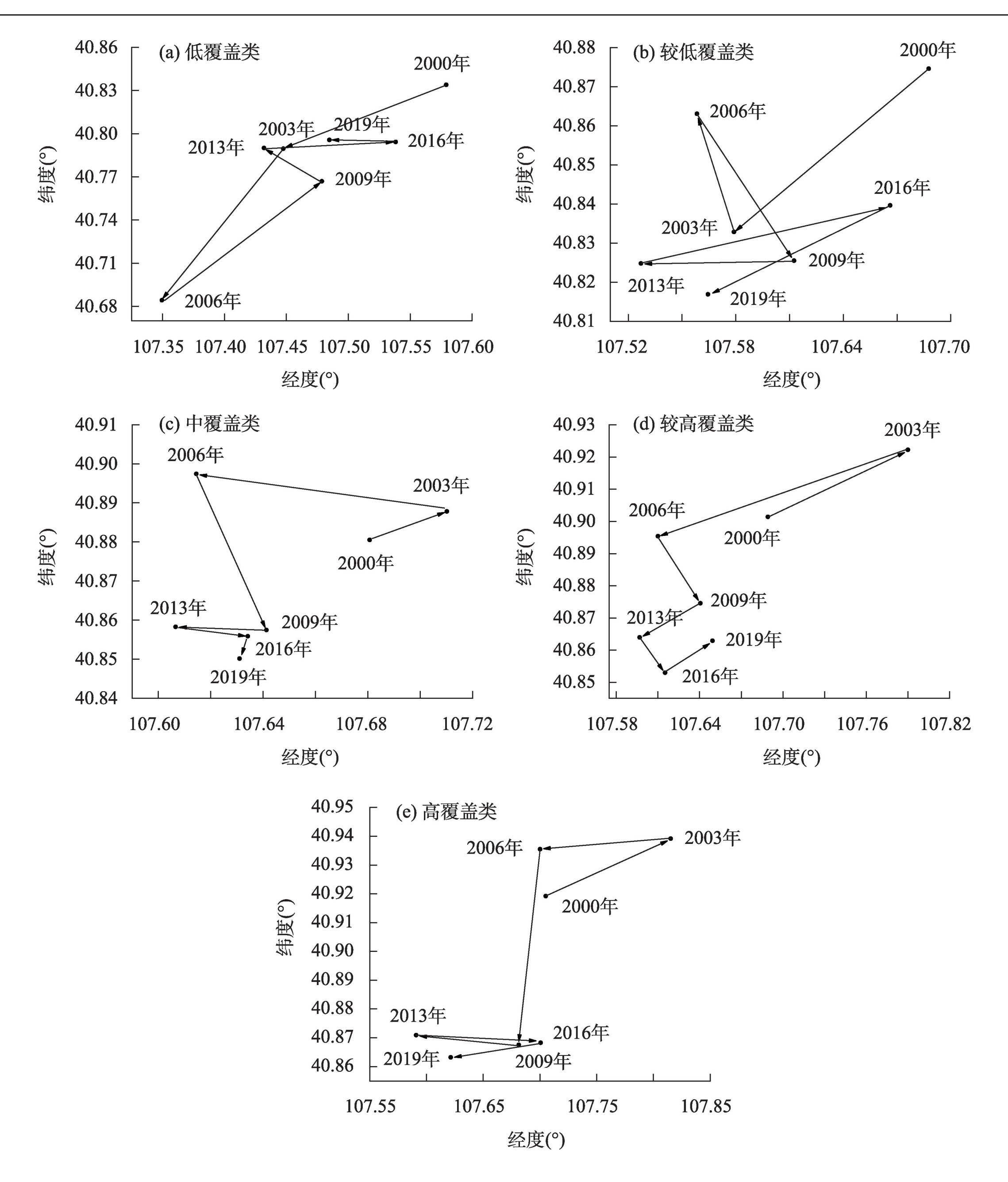


图5 各级植被覆盖度重心迁移

Fig. 5 Gravity center migration map of vegetation coverage at all levels

各因子的解释力排序依次为:地下水(0.439)>距水域距离(0.427)>降水(0.368)>气温(0.318)>距耕地距离(0.241)>距道路距离(0.220)>距居民点距离(0.174)>GDP(0.107)>高程(0.026)。其中,地下水、距水域距离、降水、气温的q值均大于0.3,是河套灌区林草植被覆盖空间分布的主导环境因子,而距耕地距离、距道路距离、距居民点距离、GDP的q值小于0.3,且对灌区林草植被覆盖空间分布的解释力相对较小,由此说明影响河套灌区的林草植被覆盖空间分布主要为自然因素。

2.4.2 探测因子交互分析 通过交互探测器分析了河套灌区的林草植被覆盖度的各个影响因子间的交互作用,结果如图7所示,在双因子的交互作用下会加强对林草植被覆盖度的解释力,以双因子增强为主。河套灌区双因子之间交互作用对林草植被覆盖度的影响较大的有距耕地距离∩地下水埋深(0.693)>距水体距离∩距居民点距离(0.610)>距居民点距离∩年平均气温(0.524)>距道路距离∩距水体距离(0.519)=距水体距离∩地下水埋深(0.519)=距居民点距离∩地下水埋深(0.519),其余因子交互

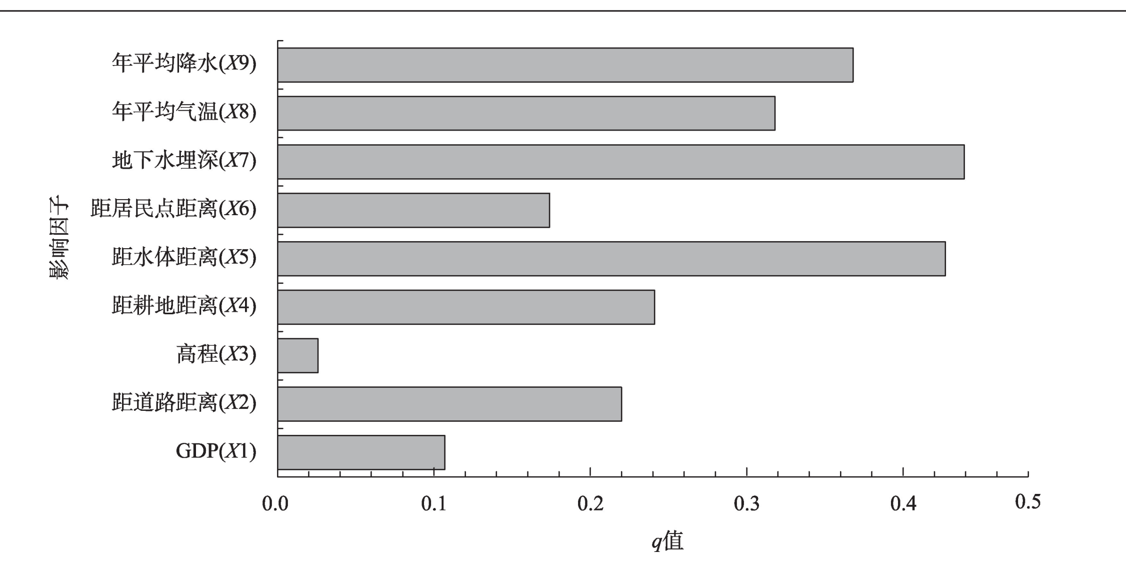


图6 河套灌区林草FVC空间分异驱动因子解释力

Fig. 6 Explanatory power statistics of driving factors of forest-grass FVC spatial differentiation in Hetao Irrigation District

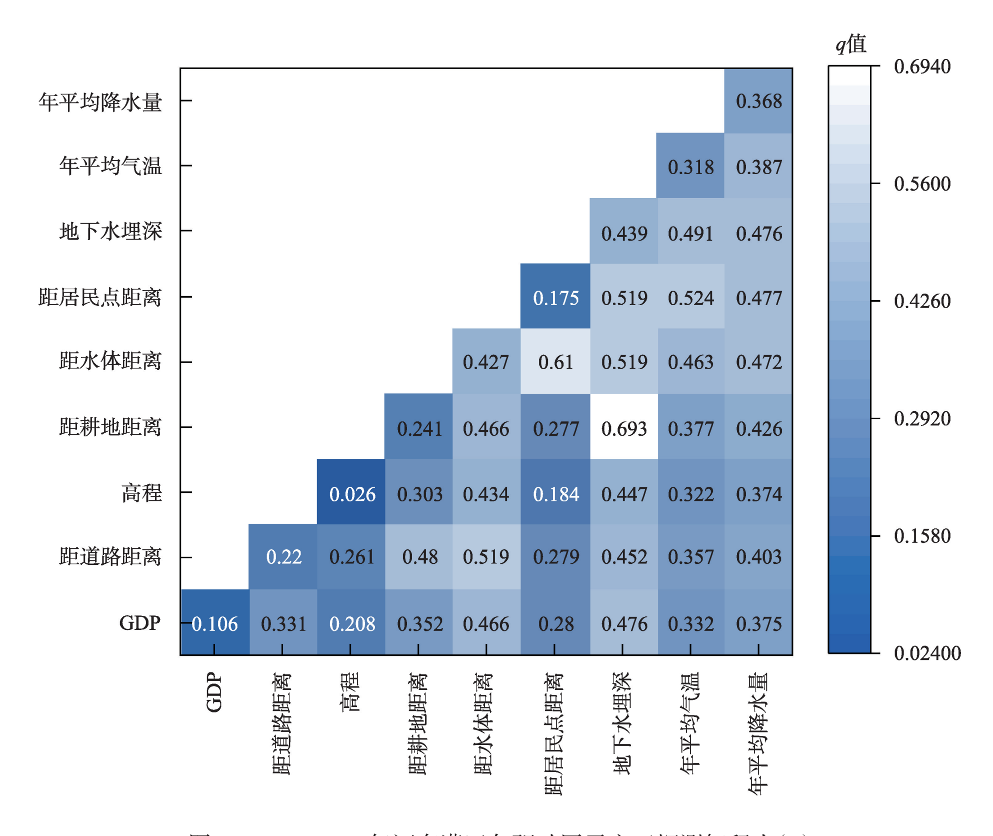


图7 2000—2019年河套灌区各驱动因子交互探测解释力(q)

Fig. 7 Interactivity detection explanatory power (q) of driving factors in Hetao Irrigation District from 2000 to 2019

作用对林草植被覆盖度的解释力均小于0.5,距水域距离、地下水埋深、年平均降水与其他因子的交互作用普遍较高,表明了区域含水量的大小是影响河套灌区的林草地生长情况好坏的主要因子。

2.4.3 风险区探测 由于本文所选取驱动因子中的GDP和高程的单因素分析与交互分析的解释力均比较小,所以风险探测仅列出了其他7个主要因素。如表4所示,河套灌区林草植被在147~157 mm的降水区间内植被覆盖度均值最高,并且总体上林草植被覆盖随着降水的增多而逐渐增大,与降水量呈正相关关系,这也表明河套灌区降水量的多少是林草地的生长状况好坏的关键因素。林草植被在8.9~9.2 ℃年平均气温区间内的植被覆盖度均值最高,林草地植被在1.8~2.8 m地下水区间内的植被覆

表4　驱动因子最适范围

Tab. 4　Optimum range of driving factors

探测因子	指标	最大FVC均值	最适范围
*X*1	距道路距离	0.387	10014~13121 m
*X*2	距耕地距离	0.467	1566~2254 m
*X*3	距水体距离	0.327	0~670 m
*X*4	距居民点距离	0.402	7537~11250 m
*X*5	地下水埋深	0.499	1.8~2.8 m
*X*6	年平均气温	0.351	8.9~9.2 ℃
*X*7	年平均降水	0.665	147~157 mm

盖度均值最高,林草植被在7537~11250 m距居民点距离区间及10014~13121 m距道路距离区间内林草植被覆盖度均值最高,并且总体上林草地植被的生长状况与距居民点距离与距道路距离呈正相关关系,表明林草植被的生长状况与人类活动呈负相关关系,距离人类活动较为活跃的地方越远,林草的生长状况越好,林草植被在1566~2254 m距耕地距离区间林草植被覆盖度均值最高,林草植被在0~670 m距水域距离区间林草植被覆盖的均值最高。

3　讨论

通过对河套灌区林草地长时序的探究发现:在研究时段内河套灌区的低植被覆盖度林草主要分布于乌兰布和灌域,而较高和高植被覆盖度林草主要分布于东部的乌梁素海的周边地区,这是因为西部林草多以沙漠—草甸的形式存在,地下水位较低、稳定性较弱,导致林草的长势较差,而东部由于存在着乌梁素海等较为丰富的水源,并且受"一湖两海"等政策的影响,生态保护力度加强,林草植被覆盖度总体呈东高西低的态势分布,并且多年河套灌区的林草植被覆盖度等级呈上升的趋势,该结论与张志强[23]等对2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化的研究结果一致。通过重心迁移模型发现,各级林草植被覆盖度重心都呈现出向西南方向迁移的态势,这主要是因为20 a来西南地区的地下水埋深与年均温的变化趋势小于东北地区,降水量的变化趋势大于东北地区(图8)。低覆盖类林草重心在整个研究时段均位于永济灌域内,高覆盖类林草的重心主要分布于义长灌域的西南侧,各级林草植被覆盖重心表现为从东北向西南方向递减。

河套灌区2000—2019年林草生长状况整体得到改善,而本文进一步指出了在这20 a间河套灌区林草地的数量有所减少,这依旧是恢复河套灌区生态环境的较大挑战,同时该结果也与王娟等[28-30]得出的区域内植被总量与单位植被覆盖度并没有太大的相关关系的结论一致。这一状况一方面与区域自然环境关联较密,一方面也与区域社会发展及工程建设相关。为充分利用灌区得天独厚的条件,

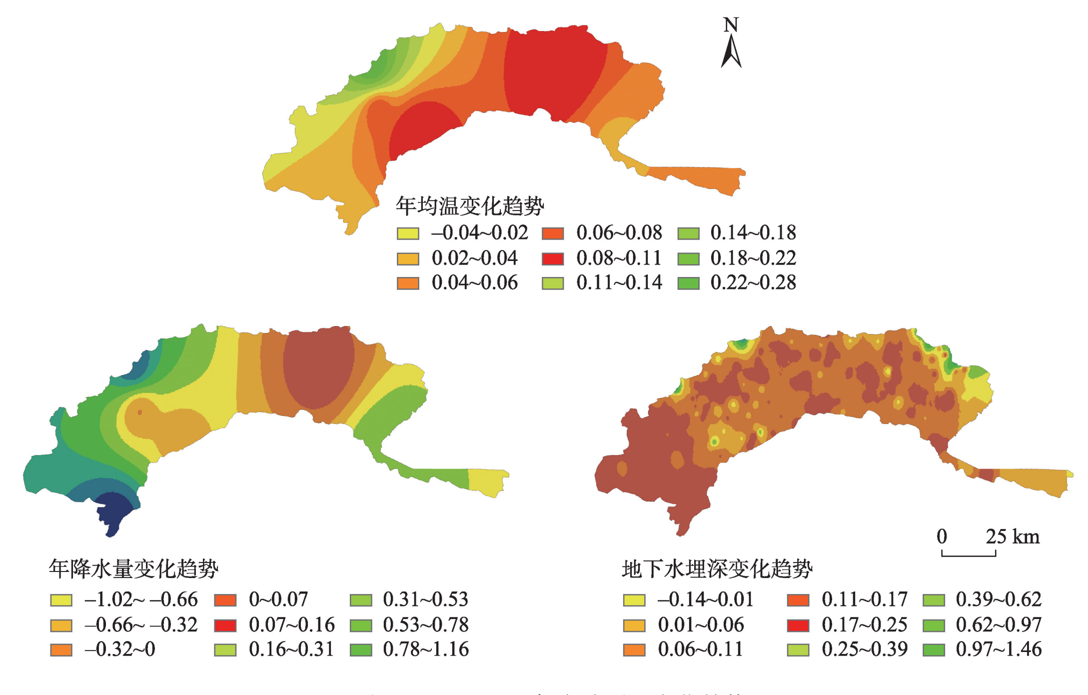


图8　2000—2019年自然因子变化趋势

Fig. 8　Trends of natural factors from 2000 to 2019

自建国开始，灌区开始大兴修建水利工程，从最初的“二黄河”、“三盛公水利枢纽”到现在的13条干渠、339条支渠、上万条毛渠供水至灌区，使灌区水资源得到了更均匀的配置[31]，进而也有利于各类植被的生长，这也是林草植被生长状况逐渐向好的重要原因。然而，在兴修水利工程同时也占用了大量林草地，并随着水利设施的完善，大量林草地被开垦为耕地，20 a间新增耕地占用林草地718 km^2，这也是导致灌区林草地数量逐年减少的主要原因。

本研究通过地理探测器并且除了选取部分自然因素，还选取了高程和部分人类活动数据，以便更全面性、针对性的分析影响林草FVC空间分布及变化的驱动因素。研究发现，距水域距离、地下水埋深、气温、降水对林草植被覆盖度空间分异的解释力要相对较强，自然条件是影响河套灌区植被覆盖度的主要驱动因子，而水热条件是影响河套灌区林草植被生长状况的主要原因，这也与李茂林等[32]对锡林郭勒盟干旱半干旱区的研究结论相似。并且20 a来，随着气候、地下水等因素的影响，西南地区的较高植被覆盖度和高植被覆盖度的数量增加，而东北地区却有所减少，通过图8可以看出，20 a间西南地区的年均气温变化趋势和地下水埋深变化趋势总体小于东北地区，西南地区的年降水量变化趋势要大于东北地区，说明土壤水分与区域植被覆盖度呈正相关关系，而气温则是呈负相关关系，这也与陈效逑等[33]对内蒙古植被覆盖度时空变化的研究结论相似。人类活动主要是距居民点距离、距耕地距离和距道路距离对林草植被覆盖的影响较大，反映出人类活动对林草植被的影响主要体现在开垦种植和占用建设等方面。

由于河套灌区主要以黄河水漫灌为主，因此各灌域的引黄水量与土壤盐碱化程度以及各灌域的生态治理措施都有着较大的差异，这些对林草植被覆盖度有着重要的影响。但在数据选取方面，由于数据收集的限制和区域尺度的制约，本文未能加入以上内容数据，以上影响因素依然是之后研究需要重点考虑和分析的内容。

4 结 论

通过对河套灌区林草面积及植被覆盖度时空分布特征分析研究，得出如下结论：

（1）2000—2019年河套灌区林草地面积总体呈减少态势，减少数量为966.15 km^2，林草植被覆盖度等级整体呈上升的趋势，多年平均林草植被覆盖度为28.3%。空间上，河套灌区林草植被覆盖度呈现出东北向西南递减的空间特征，变化最大的是乌兰布和灌域，近20 a改善的比重较大。

（2）近20 a来，各级林草植被覆盖度重心主要位于永济灌域东北侧和义长灌域西南侧，各级林草植被覆盖重心表现为从东北向西南方向递减，并均呈现出向西南方向迁移的态势，各时段迁移距离介于0.71~15.46 km。

（3）距水域距离、地下水埋深、气温、降水是影响区域内林草植被覆盖度的主导环境因子，对林草植被覆盖度的解释力均大于0.3，高程对林草植被覆盖度的解释力最弱为0.026；各驱动因子间的交互作用以双因子增强为主，其中距水域距离、地下水埋深、年平均降水与其他因子的交互作用要普遍较高，解释力均超过0.35，说明了区域含水量的大小是影响河套灌区的林草地生长状况的主要影响因子，通过风险探测各驱动因子对河套灌区林草植被生长的影响均有其适宜的范围。

参考文献(References)：

[1] 陈元鹏, 任佳, 王力. 基于多源遥感数据的生态保护修复项目区监测方法评述[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8789-8797. [Chen Yuanpeng, Ren Jia, Wang Li. Review on monitoring method of ecological conservation and restoration project area based on multi-source remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8789-8797.]

[2] Dragoni D, Schmid H P, Wayson C A , et al. Evidence of increased net ecosystem productivity associated with a longer vegetated season in a deciduous forest in south-central Indiana, USA[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 886-897.

[3] Li J, Xu B, Yang X, et al. Historical grassland desertification changes in the Horqin Sandy Land, Northern China (1985-2013)[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3009-3018.

[4] Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(18): 3519-3535.

[5] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774-782. [Jia Kun, Yao Yunjun, Wei Xiangqin, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing[J]. Advances in Earth Sciences, 2013, 28(7): 774-782.]

[6] Feng H, Zou B, Luo J . Coverage-dependent amplifiers of vegetation change on global water cycle dynamics[J]. Journal of Hydrolo-

gy, 2017, 550: 220-229.

[7] 张朔川, 汤军, 高贤君. 秦皇岛市2001—2020年植被覆盖动态变化及预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13254-13261. [Zhang Shuochuan, Tang Jun, Gao Xianjun. Dynamic changes and forecast analysis of vegetation coverage in Qinhuangdao from 2001 to 2020[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13254-13261.]

[8] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于GEE云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1439-1450. [Li Jing, Yan Xingguang, Yan Xiaoxiao, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River Basin based on GEE cloud platform[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1439-1450.]

[9] 杨辰丛海. 2000—2021年平和县植被覆盖度变化及其地形驱动因子分析[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(8): 1625-1628. [Yang Chenconghai. Vegetation coverage change and terrain driving factor analysis of Pinghe County from 2000 to 2021[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2021, 62(8): 1625-1628.]

[10] 郑勇. 川西高原近20年植被覆盖遥感动态监测及驱动力分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1447-1456. [Zheng Yong. Remote sensing dynamic monitoring and driving force analysis of vegetation cover in western Sichuan Plateau in recent 20 years[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6): 1447-1456.]

[11] 王瑾, 闫庆武, 谭学玲, 等. 内蒙古地区植被覆盖动态及驱动因素分析[J]. 林业资源管理, 2019(4): 159-167. [Wang Jin, Yan Qingwu, Tan Xueling, et al. Analysis of vegetation cover dynamics and driving factors in Inner Mongolia[J]. Forest Resources Management, 2019(4): 159-167.]

[12] 曹永香, 毛东雷, 薛杰, 等. 绿洲-沙漠过渡带植被覆盖动态变化及其驱动因素——以新疆策勒为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 510-521. [Cao Yongxiang, Mao Donglei, Xue Jie, et al. Dynamic changes and driving factors of vegetation cover in the oasis-desert ecotone: A case study of Cele, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 510-521.]

[13] 张思源, 聂莹, 张海燕, 等. 基于地理探测器的内蒙古植被NDVI时空变化与驱动力分析[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1460-1472. [Zhang Siyuan, Nie Ying, Zhang Haiyan, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its driving forces in Inner Mongolia based on geodetector[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1460-1472.]

[14] 马晓妮, 任宗萍, 谢梦瑶, 等. 基于地理探测器的砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3389-3399. [Ma Xiaoni, Ren Zongping, Xie Mengyao, et al. Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in the Pisha sandstone area based on geodetector[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3389-3399.]

[15] 孙微. 陕北地区农牧交错带植被覆盖度动态及驱动力分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. [Sun Wei. Northern of Shaanxi Province Farming-pastoral Region Vegetation Coverage Dynamic Force Analysis[D]. Beijing: Forestry University, 2012.]

[16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geographic detector principle and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[17] 席文涛, 高晶. 基于地理探测器分析青藏高原降水$\delta^{18}O$空间分异特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1199-1206. [Xi Wentao, Gao Jing. Spatial heterogeneity of annual precipitation $\delta^{18}O$ over the Tibetan Plateau based on the use of a geographical detector[J]. Arid Zone Reearch, 2021, 38(5): 1199-1206.]

[18] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 等. 基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 826-836. [Meng Qi, Wu Zhitao, Du Ziqiang, et al. Quantitative influence of regional fractional vegetation cover based on geodetector model: Take the Beijing-Tianjin sand source region as an example[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 826-836.]

[19] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 等. 2006—2016年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1583-1594. [Zhu Cong, Peng Wenfu, Zhang Lifang, et al. Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1583-1594.]

[20] 高鹏文, 阿里木江·卡斯木, 赵永玉, 等. 1988—2018年哈密绿洲植被覆盖度时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 273-280. [Gao Pengwen, Kasim Alimujiang, Zhao Yongyu, et al. Spatial and temporal changes and driving forces of vegetation coverage in Hami Oasis during 1988-2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 273-280.]

[21] 潘志华, 安萍莉, 刘亚玲, 等. 北方农牧交错带生态系统自然环境变化研究——以武川县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2003, 24(5): 41-45. [Pan Zhihua, An Pingli, Liu Yaling, et al. Study on the changes of natural environment in the agro-pastoral ecotone of North China: A case study of Wuchuan County [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2003, 24(5): 41-45.]

[22] 张亦然. 耦合“空-天”遥感的科尔沁沙丘-草甸相间地区植被覆盖度解译及其时空演变规律[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [Zhang Yiran. The Interpretation of Vegetation Coverage and Its Temporal and Spatial Evolution in Horqin Dune-Meadow Interphase Area Coupled with “Sky-Sky” Remote Sensing[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]

[23] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 849-858. [Zhang Zhiqiang, Liu Huan, Zuo Qiting, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019[J]. Resource Science, 2021, 43(4): 849-858.]

[24] 苏丽德, 王海兵, 左合君. 1986—2019年乌拉特后旗荒漠化动

态演变及其成因研究[J]. 绿色科技, 2020(12): 1-6. [Su Lide, Wang Haibing, Zuo Hejun. Analysis on the dynamic evolution and causes of desertification in the later period of urat from 1986 to 2019[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(12): 1-6.]

[25] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019年中国陆表定量遥感发展综述[J]. 遥感学报, 2020, 24(6): 618-671. [Liang Shunlin, Bai Rui, Chen Xiao'na, et al. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2020, 24(6): 618-671.]

[26] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003. [Li Miaomiao. Research on Remote Sensing Estimation Method of Vegetation Coverage[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, 2003.]

[27] 中华人民共和国水利行业标准. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2008. [Water Industry Standard of the People's Republic of China. SL 190-2007 Standard for Classification and Classification of Soil Erosion[S]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2008.]

[28] 王娟, 李宝林, 余万里. 近30年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 132-138. [Wang Juan, Li Baolin, Yu Wanli. Analysis of vegetation trend and their causes during recent 30 years in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(2): 132-138.]

[29] 高宇婷, 于洋, 孙凌霄, 等. 塔里木盆地南缘绿洲土地覆盖变化及驱动力[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1172-1183. [Gao Yuting, Yu Yang, Sun Lingxiao, et al. Land coverage change and driving forces of an oasis in the southern margin of Tarim Basin[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1172-1183.]

[30] 曹翊坤, 付梅臣, 谢苗苗, 等. 基于LSMM与MSPA的深圳市绿色景观连通性研究[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 526-536. [Cao Yikun, Fu Meichen, Xie Miaomiao, et al. Landscape connectivity dynamics of urban green landscape based on morphological spatial pattern analysis(MSPA) and linear spectral mixture model (LSMM) in Shenzhen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 526-536.]

[31] 闫晋阳, 马向阳, 王晨霞. 河套灌区国管水利工程保护与管理问题分析及对策建议[J]. 中国水利, 2021(15): 58-59. [Yan Jinyang, Ma Xiangyang, Wang Chenxia. Analysis and countermeasures on protection and management of water conservancy projects in Hetao Irrigation District[J]. China Water Resources, 2021(15): 58-59.]

[32] 李茂林, 闫庆武, 仲晓雅, 等. 干旱半干旱地区植被覆盖度变化及主导因素分析:以锡林郭勒为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(12): 1548-1558. [Li Maolin, Yan Qingwu, Zhong Xiaoya, et al. Analysis on evolution and dominant factors of fractional vegetation coverage in arid and semi-arid regions: A case of Xilingol [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(12): 1548-1558.]

[33] 陈效逑, 王恒. 1982—2003年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 84-94. [Chen Xiaoqiu, Wang Heng. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(1): 84-94.]

Spatiotemporal change and analysis of factors driving forest-grass vegetation coverage in Hetao Irrigation District based on geographical detector

LI Xinlei[1], LI Ruiping[1,2], WANG Xiuqing[3], WANG Sinan[1], WANG Chengkun[1]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Big Data Research and Application in Agriculture and Animal Husbandry, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 3. Surveying, Mapping and Geographic Information Center of Inner Mongolia, Hohhot 010050, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on the data on forest and grass vegetation coverage from 2000 to 2019, the spatiotemporal change of forest and grass vegetation in Hetao Irrigation District over 20 years was analyzed, and the influence of various factors driving forest and grass vegetation coverage was quantitatively analyzed using a geographical detector. The results showed the following: (1) The area of forest and grassland in Hetao Irrigation District showed a decreasing trend in the studied 20 years, with a decrease of 966.15 km^2. The vegetation coverage level of forest and grassland showed an overall upward trend. The average annual vegetation coverage of forest and grassland was 28.3%. On the spatial scale, the vegetation coverage of forest and grassland in Hetao Irrigation District showed a spatial variation characteristic of decreasing from northeast to southwest. (2) In the studied 20 years, the centers of gravity of low forest and grass vegetation coverage and medium forest and grass vegetation coverage have mainly been located in the northeast of Yongji irrigation area and the southwest of Yichang irrigation area, respectively. The centers of gravity of forest and grass vegetation coverage at all levels show a decreasing trend from northeast to southwest, and all show a trend of migration to the southwest. The migration distance in each period was between 0.71 and 15.46 km. (3) Distance from water, groundwater depth, temperature, and precipitation are the dominant environmental factors affecting the forest and grass vegetation coverage in the region, with explanatory power of 0.427, 0.439, 0.318, and 0.368, respectively. The interaction between distance from water, groundwater depth, annual average precipitation, and other factors is generally higher, and the regional water content is the main driving force affecting the growth of forest and grassland in Hetao Irrigation District.

Keywords: Hetao Irrigation District; vegetation coverage; spatiotemporal change; driving factor; geographical detector